

文章编号: 1000-5471(2012)03-0040-04

半导体温差发电器的热力学准则和性能参数^①

胡 华, 王玉娟, 周利伶, 周雪云, 曾 玮, 谢卫军

九江学院 理学院, 江西 九江 332000

摘要: 应用非平衡态热力学和有限时间热力学理论, 导出了半导体温差发电机输出功率和效率的一般表达式; 兼顾输出功率和效率, 给出了半导体温差发电机优化性能的热力学准则; 分析了效率随塞贝克系数与汤姆孙系数之比的变化, 指出塞贝克系数与汤姆孙系数之比是半导体温差发电器的一个重要性能参数。

关键词: 非平衡态热力学; 有限时间热力学; 半导体温差发电机; 优化性能; 热力学准则; 性能参数

中图分类号: O414

文献标志码: A

半导体温差发电机是一种利用半导体温差电效应实现热电直接转换的器件, 具有清洁、环保、体积小、寿命长、稳定性好等一系列优点, 其理论研究和开发应用受到国内外学者的广泛重视。目前半导体温差发电器的研究主要有两方面: 一是借助各种新技术研发新型热电材料, 提高热电材料的优值系数; 二是应用非平衡态热力学和有限时间热力学理论, 研究发电器的各种不可逆性和结构参数对发电性能的影响, 优化热电转换性能^[1-14]。文献[1]和文献[2]分别讨论了汤姆孙热对最大输出功率和对最大输出功率时热电转换效率的影响。本文进一步分析在兼顾输出功率和效率的情况下, 半导体温差发电器的优化性能, 以及焦耳热、傅里叶热和汤姆孙热的影响。

1 发电机理论模型

半导体温差发电机由 P 型和 N 型半导体材料制成的电偶臂组成(图 1)。设 P 型和 N 型电臂的塞贝克系数、汤姆逊系数、热导率、电阻率、截面积和长度分别为 $\alpha_p, \alpha_n, \tau_p, \tau_n, k_p, k_n, \rho_p, \rho_n, S_p, S_n, l_p, l_n$, 高温端温度为 T_h , 低温端温度为环境温度 T_0 , 两电臂侧面绝热, 负载电阻为 R 。根据非平衡态热力学和有限时间热力学理论^[1,15-16], 发电机输出电流为 I 时, 两电臂的热传导方程为:

$$k_n S_n \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} - \tau_n I \frac{\partial T_n}{\partial x} + \frac{\rho_n I^2}{S_n} = 0 \quad (1)$$

$$k_p S_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \tau_p I \frac{\partial T_p}{\partial x} + \frac{\rho_p I^2}{S_p} = 0 \quad (2)$$

边界条件: $T_n(0) = T_p(0) = T_0, T_n(l_n) = T_p(l_p) = T_h$ 。

利用(1)式和(2)式可确定高温端流入和低温端流出的热流率

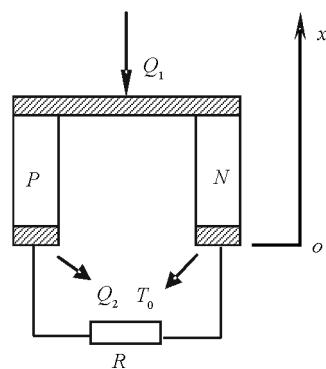


图 1 半导体温差发电机原理

① 收稿日期: 2011-03-10

作者简介: 胡 华(1958-), 男, 辽宁法库人, 教授, 主要从事热力学与统计物理学的研究。

$$Q_1 = \alpha^h T_h I + k_n S_n \left. \frac{dT_n}{dx} \right|_{x=l_n} + k_p S_p \left. \frac{dT_p}{dx} \right|_{x=l_p} = \alpha^h T_h I + K \Delta T - \frac{1}{2} r I^2 - \frac{1}{2} \tau \Delta T I + \frac{1}{12} \left(\frac{\tau_p r_p}{K_p} - \frac{\tau_n r_n}{K_n} \right) I^3 \quad (3)$$

$$Q_2 = \alpha^0 T_0 I + k_n S_n \left. \frac{dT_n}{dx} \right|_{x=0} + k_p S_p \left. \frac{dT_p}{dx} \right|_{x=0} = \alpha^0 T_0 I + K \Delta T + \frac{1}{2} r I^2 + \frac{1}{2} \tau \Delta T I + \frac{1}{12} \left(\frac{\tau_p r_p}{K_p} - \frac{\tau_n r_n}{K_n} \right) I^3 \quad (4)$$

式中: $\alpha^h = \alpha_p^h - \alpha_n^h$, $\alpha^0 = \alpha_p^0 - \alpha_n^0$ 分别为发电机高温端和低温端的塞贝克系数, 均为温度的函数; $\tau = \tau_p - \tau_n$, $K = K_p + K_n = k_p S_p / l_p + k_n S_n / l_n$, $r = r_p + r_n = \rho_p l_p / S_p + \rho_n l_n / S_n$ 分别为发电器的汤姆孙系数、传热系数和内电阻; $\Delta T = T_h - T_0$ 为高低温端之间的温差. (3) 式和(4) 式右边前 4 项依次为帕耳帖热、傅里叶热、焦耳热、汤姆孙热; 末项为傅里叶效应、焦耳效应、汤姆孙效应相互作用的耦合热. 计算表明, 其量级仅为汤姆孙热的 10^{-3} , 均可忽略.

2 优化性能的热力学准则

由(3) 式和(4) 式得输出功率、效率分别为:

$$P = (\alpha^h T_h - \alpha^0 T_0 - \tau \Delta T) I - r I^2 = R I^2 \quad (5)$$

$$\eta = \frac{(\alpha^h T_h - \alpha^0 T_0 - \tau \Delta T) I - r I^2}{(\alpha^h T_h - \frac{1}{2} \tau \Delta T) I - \frac{1}{2} r I^2 + K \Delta T} \quad (6)$$

由(5) 式和(6) 式可以看出, 傅里叶效应不影响功率, 但影响效率, 而汤姆孙效应和焦耳效应不仅使输出功率减小, 而且影响效率.

选用 P 型半导体材料 $Sb_2 Te_3$ (75%) $Bi_2 Te_3$ (25%) 和 N 型半导体材料 $Bi_2 Te_3$ (90%) $Bi_2 Se_3$ (10%) 作为发电器电偶臂, 几何尺寸为 $9 \text{ mm}^2 \times 4 \text{ mm}$, 材料物性参数见文献[5], $T_0 = 290 \text{ K}$, $\Delta T = 100 \text{ K}$. 由(5) 式和(6) 式作 $P \sim \eta$ 特性曲线(图 2 中实线), 曲线呈闭合状, 这是傅里叶效应作用的结果. 由(5) 式和(6) 式知, 当 $I = 0$ 时, $p = 0$, $\eta = 0$. 这相当于负载开路($R = \infty$), 无电流输出, 输出功率和效率必为零. 当 $I = (\alpha^h T_h - \alpha^0 T_0 - \tau \Delta T) / r$ 时, $p = 0$, $\eta = 0$. 这对应于负载短路($R = 0$), 输出电压为零, 输出功率和效率也为零. 闭合曲线上存在两极值点 $a(P_{\max}, \eta_m)$ 和 $b(\eta_{\max}, P_m)$. 兼顾输出功率和效率, 发电机优化性能的热力学准则应为:

$$P_m \leq P \leq P_{\max} \quad (7)$$

$$\eta_m \leq \eta \leq \eta_{\max} \quad (8)$$

(7) 式和(8) 式既指出了发电机输出功率和效率界限, 又给出了发电机优化性能范围. 由(5) 式和(6) 式还可确定合理的输出电流范围:

$$I_{\eta_{\max}} \leq I \leq I_{P_{\max}} \quad (9)$$

$P \sim \eta$ 特性曲线大小形状由 $\alpha^h, \alpha^0, K, r, \tau$ 和 ΔT 决定. 对于 α^h, α^0 和 ΔT 一定, K, r, τ 分别增大一倍, 相应的 $P \sim \eta$ 特性曲线分别为图 2 中的点划线、双点划线、虚线. 可以看出, K 对最大输出功率无影响但使最大效率明显减小; τ 和 r 均使最大输出功率和最大效率显著减小. 这是因为发电机工作时, 高温端 Q_1 中的傅里叶热流直接从低温端流出, 对输出功率无贡献, 从而使效率减小. 电流流经一定温差的电偶臂释放焦耳热和汤姆孙热, 导致可用能损失, 使得输出功率和效率均减小. 传热系数、内阻、汤姆孙系数越大, 对发电机性能的影响就越严重.

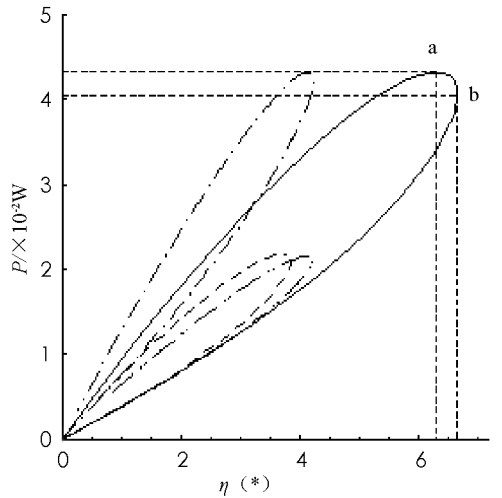


图 2 $P \sim \eta$ 特性曲线

3 塞贝克系数与汤姆孙系数之比对效率的影响

设 $\alpha^h = \alpha^0 = \alpha$, 由(5)式知, 负载匹配电阻 $R = r$, 输出功率最大. 此时输出电流为

$$I = \frac{(\alpha - \tau)\Delta T}{2r} \quad (10)$$

将(10)式代入(6)式, 相应效率为

$$\eta = \frac{2(\alpha - \tau)^2 \Delta T}{(\alpha - \tau)[4\alpha T_0 + (3\alpha - \tau)\Delta T] + 8Kr} \quad (11)$$

令 $Z = \alpha^2 / (Kr)$, $m = \alpha / \tau$, (11)式可表示为

$$\eta = \frac{2(1 - 1/m)^2 \Delta T}{(1 - 1/m)[4T_0 + (3 - 1/m)\Delta T] + 8/Z} \quad (12)$$

式中: Z 为发电器的优值系数, m 为塞贝克系数与汤姆孙系数之比. (12)式给出了 η, Z, m 之间的关系. $T_0 = 290 \text{ K}$, $\Delta T = 100 \text{ K}$, $Z = 0.0013 \text{ K}^{-1}$, η 随 m 变化曲线见图 3 中实线. 由图 3 可以看出, 当 m 较小时 η 随 m 增大而迅速增大, 当 m 较大时 η 随着 m 增大而缓慢趋近 $2\Delta T / (4T_0 + 3\Delta T + 8/Z)$. 这表明, 当 m 较小时, 汤姆孙效应对效率影响明显, 增大 m 可以有效提高 η . 当 m 达到一定时, 继续增大 m 对提高 η 作用不大. 比较图 3 中实线和虚线还可知, Z 不改变 η 随 m 变化的特征, 但增大 Z 显著提高 η . 可见, Z 和 m 是表征半导体温差发电器性能的两个重要参数. 由于 Z 仅反映傅里叶效应和焦耳效应的影响, 未反映汤姆孙效应的影响, 因此 m 是半导体温差发电器不可或缺的一个重要性能参数, 值得重视. 增大 Z 并选择适当的 m , 可以更有效地提高发电效率. m 可为半导体温差发电器的优化设计提供一条新的热力学依据.

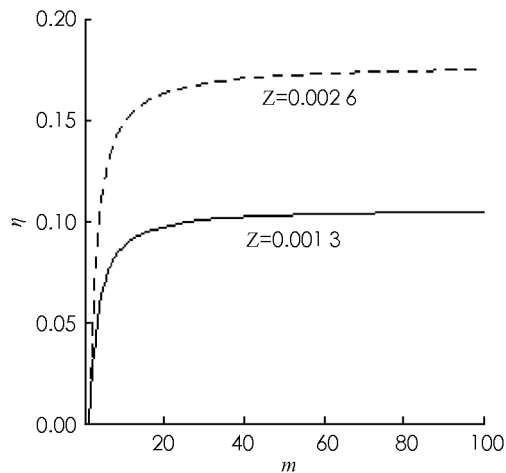


图 3 η 随 m 变化曲线

4 结 语

本文应用非平衡态热力学理论, 导出了半导体温差发电器的输出率和效率的一般表达式, 对其作了进一步讨论, 得到半导体温差发电器优化性能的热力学准则. 对效率和塞贝克系数与汤姆孙系数之比间的关系作了分析, 指出塞贝克系数与汤姆孙系数之比是半导体温差发电器的一个重要性能参数.

参考文献:

- [1] 吴丽清, 陈金灿, 严子浚. 导体温差发电器件的输出功率 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1996, 35(2): 210-213.
- [2] 贾 磊, 陈则韶, 胡 芑, 等. 半导体温差发电器件的热力学分析 [J]. 中国科学技术大学学报: 自然科学版, 2004, 34(6): 684-687.
- [3] LAMPINEN M J. Thermodynamic Analysis of Thermoelectric Generator [J]. J Appl Phys, 1991, 69(8): 4318-4323.
- [4] 陈金灿, 严子浚. 半导体温差发电器性能的优化分析 [J]. 半导体学报, 1994, 15(2): 123-129.
- [5] 周颖慧. 新型半导体温差发电器的优化设计 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001, 40(4): 882-887.
- [6] 曲 建, 李茂德, 乐 伟, 等. 半导体温差发电器的工作性能优化 [J]. 低温工程, 2005, 2: 20-23.
- [7] CHEN J, LIN B, WANG H, et al. Optimal Design of a Multi-couple Thermoelectric Generator [J]. Semicond Sci Technol, 2000, 15: 184-188.
- [8] 郑慧雯, 茹克也木·沙吾提, 章娟君. 功能梯度材料的研究进展 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2002, 27(5): 788-793.
- [9] 刘向阳, 任 山, 闻立时. 微型热电器件研究进展 [J]. 材料导报, 2007, 21(3): 5-9.
- [10] OMER S A, INFELD D G. Design Optimization of Thermoelectric Devices for Solar Power Generation [J]. Solar Energy Materias and Solar Cells, 1998, 53: 67-82.
- [11] 林比宏, 陈晓航, 陈金灿. 太阳能驱动半导体温差发电器性能参数的优化设计 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(10): 1021-1026.

- [12] 潘玉灼, 林比宏. 结构参数与不可逆性对热电发电机性能的影响 [J]. 泉州师范学院学报: 自然科学, 2006, 24(6): 13-18.
- [13] 李茂德, 屈 健, 李玉东, 等. 接触效应对小型半导体温差发电机性能的影响 [J]. 半导体学报, 2005, 26(12): 2440-2444.
- [14] 蔡永华, 肖金生, 翟鹏程, 等. 低温热电器件的结构尺寸优化 [J]. 太阳能学报, 2010, 31(8): 1073-1078.
- [15] 汪志诚. 热力学·统计物理 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 143-148.
- [16] BEJAN A. Advanced Engineering Thermodynamics [M]. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2006: 665-675.

Thermodynamics Criteria and Performance parameter of a semiconductor Thermoelectric Generator

HU Hua, WANG Yu-juan, ZHOU Li-ling,
ZHOU Xue-yun, ZENG Wei, XIE Wei-jun

Science of College, Jiujiang University, Jiujiang Jiangxi 332000

Abstract: The general expressions of the power and the efficiency of a semiconductor thermoelectric generator are derived by using the theory of non-equilibrium thermodynamics and finite-time thermodynamics. The thermo-dynamics criteria on the optimal performance of a semiconductor thermoelectric generator is given while both the power and the efficiency are at a relatively high level. The efficiency varying with the ratio of Seebeck's coefficient to Thomson's coefficient is analyzed, and it is pointed out that the ratio of Seebeck's coefficient to Thomson's coefficient is an important performance parameter of a semiconductor thermoelectric generator.

Key words: non-equilibrium thermodynamics; finite-time thermodynamics; semiconductor thermoelectric generator; optimal performance; thermodynamics criteria; performance parameter

责任编辑 潘春燕